

doi: 10. 20008/j. kckc. 202302005

综合物探方法在青海祁漫塔格浅覆盖区 铁多金属矿区深部找矿中的应用研究 ——以野马泉矿区为例

喻忠鸿¹, 王金海^{1 2}, 詹俊¹, 张占雄¹, 才智杰¹, 刘国燕¹, 曹创华^{2 3}

(1. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810000; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;
3. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116)

摘要 祁漫塔格成矿带上的许多矿床位于山前覆盖区, 地质和化探手段受到限制, 以往找矿工作中以磁法寻找铁多金属矿产为主, 弱磁异常区段的成矿潜力尚未进行研究。野马泉矿区是该成矿带上典型的矽卡岩铁多金属矿床, 经过多年找矿工作后, 磁异常已经评价完毕。为研究深边部, 尤其是弱磁异常区的成矿潜力, 近年来在该矿区开展了重力和广域电磁法联合方法, 成功追索了矽卡岩型多金属矿带的深部延伸情况。综合物探方法在野马泉矿区深边部找矿中发挥了重要指导作用, 表明地球物理探测方法在覆盖区深部找矿过程中具有明显的优势, 为祁漫塔格成矿带覆盖区深边部找矿工作提供了成功经验。

关键词 综合物探; 深边部找矿; 覆盖区; 祁漫塔格; 野马泉; 青海

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7801(2023)02-0204-10

Application of comprehensive geophysical method in deep prospecting of iron polymetallic deposit in Qimantage shallow covered area of Qinghai Province——A case study of Yemaquan deposit

YU Zhonghong¹, WANG Jinhai^{1 2}, ZHAN Jun¹, ZHANG Zhanxiong¹,
CAI Zhijie¹, LIU Guoyan¹, CAO Chuanghua^{2 3}

(1. The Third Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Geology Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, Hunan, China)

Abstract: Many deposits in Qimantag metallogenic belt are located in the Piedmont coverage area, and the ge-

[收稿日期]2021-11-12; [改回日期]2022-03-14

[基金项目]本文受青海省地质勘查基金项目(2017042014ky014)、青海学者专项(QHS201802)、青海省科技计划项目(2019-SF-141)、青海省地矿局高层次人才培养项目(青地矿科[2021]61号)和青海省中央引导地方科技发展资金计划项目(2021ZY017)联合资助。

[第一作者简介]喻忠鸿,男,1983年生,硕士,高级工程师,主要从事综合地球物理方法技术研究与应用工作;E-mail: piscesfish@163.com。

[通信作者简介]王金海,男,1984年生,博士生,高级工程师,主要从事综合地球物理方法技术研究与应用工作;E-mail: 190337380@qq.com。

[引文格式]喻忠鸿,王金海,詹俊,张占雄,才智杰,刘国燕,曹创华. 2023. 综合物探方法在青海祁漫塔格浅覆盖区铁多金属矿区深部找矿中的应用研究[J]. 矿产勘查, 14(2): 204-213.

Yu Zhonghong, Wang Jinhai, Zhan Jun, Zhang Zhanxiong, Cai Zhijie, Liu Guoyan, Cao Chuanghua. 2023. Application of comprehensive geophysical method in deep prospecting of Iron polymetallic deposit in Qimantage shallow covered area of Qinghai Province——A case study of Yemaquan deposit[J]. Mineral Exploration, 14(2): 204-213.

ological and geochemical exploration methods are limited. In the past, magnetic prospecting is mainly used to find iron polymetallic minerals, and the metallogenic potential in the weak magnetic anomaly section has not been studied. The Yemaquan mining area is a typical skarn iron polymetallic deposit in this metallogenic belt. After years of prospecting, the magnetic anomaly has been evaluated. In order to study the metallogenic potential in the deep edge, especially in the weak magnetic anomaly area, the combined method of gravity and wide area electromagnetic method has been carried out in the mining area in recent years, and the deep extension of skarn type polymetallic ore belt has been successfully traced. The comprehensive geophysical exploration method has played an important guiding role in deep edge prospecting in Yemaquan mining area, which shows that geophysical exploration method has obvious advantages in deep prospecting in overburden area. These studies provide successful experience for deep edge prospecting in the covered area of Qimantag metallogenic belt.

Keywords: comprehensive geophysical prospecting; deep prospecting; coverage area; Qimantag; Yemaquan; Qinghai Province

0 引言

青海省祁漫塔格地区位于东昆仑造山带西段、柴达木盆地西南缘,是较有远景的矽卡岩型铁铜多金属成矿带,是原国土资源部确定的中国十大新的战略资源接替基地之一(刘维和吴岗,2010),也是青海省重要的金属矿产基地之一。带内查明的矽卡岩型铁、铜多金属矿床(点)星罗棋布,有野马泉、肯德可克和尕林格矿床(刘云华等,2006;寇玉才等,2010;宋忠宝等,2010)、卡而却卡、四角羊(牛苦头)、虎头崖、景忍、迎庆沟、它温查汉等(丰成友等,2009;张爱奎等,2010a,2010b;李双龙等,2022)。祁漫塔格成矿带经过几十年的地质找矿和勘查工作后,在地表和浅部矿基本已枯竭的情况下,寻找下步找矿空间是带内各矿区均面临的问题。若通过深部找矿手段,在各矿区的深边部取得找矿进展和突破,将极大缓解祁漫塔格成矿带矿产资源后备储量不足的问题。

物探方法作为深部勘查的重要技术手段,众多学者对其在祁漫塔格成矿带深部和覆盖区找矿中的作用进行了研究(袁桂琴等,2012;汪青松等,2020,2021),在实际工作中也得到越来越多的应用,从一些应用案例来看(吴烈善和彭省临,2004;陈丙强和田旭锋,2011;敬荣中等,2011;谭红艳等,2011;常志岐等,2012;张叶鹏等,2016;严永邦等,2018),以重、磁、常规电法、电磁法、井中物探等综合物探方法应用较多,单方法较少。这为祁漫塔格成矿带的深部找矿工作提供了借鉴。

野马泉矿区(东经 $91^{\circ}58'$ 、北纬 $36^{\circ}59'$)位于祁

漫塔格成矿带浅覆盖区域,是典型的矽卡岩型铁多金属矿床,矿床规模中型,铁资源量约1493万t。矿区第四系广布,地质和化探方法受到限制,物探方法特别是磁法是该矿床在找矿工作中的主要技术手段,常规地面电法由于覆盖厚度及炭质地层的影响,也难以发挥作用。在开展以磁异常为线索、寻找铁磁性相关矿产的找矿工作后,矿区主要磁异常已基本评价验证完毕,亟待寻找下步找矿空间和方向。

2012—2013年,青海省第三地质勘查院在野马泉地区开展了1:5万重力面积性工作,工作面积约 860 km^2 ,获取了大量物探基础数据资料,厘定了矿区基础地质格架,研究了与成矿有关的地层、岩体等地质要素的分布特征,为弱磁异常带找矿工作奠定了基础。2019年,西部矿业公司和青海省第三地质勘查院在野马泉矿区针对M1至M3磁异常之间的弱磁异常区以及剩余重力异常梯级带,开展了广域电磁法工作,对深部岩体及地层的分布情况开展研究,经钻探验证在深部发现了铜多金属矿体。

野马泉矿区重力和广域电磁法的综合应用,突破了单纯以磁异常为找矿手段的找矿思路,进一步扩大了野马泉矿区的矿体规模和找矿远景,为祁漫塔格成矿带弱磁异常区段的找矿工作提供了示范。

1 地质特征

1.1 区域地质背景

祁漫塔格地区位于东昆仑造山带西段(图1),大地构造上位于柴达木陆块与昆中陆块之间(张爱奎等,2016;朱传宝等,2018),从区域地质图上可以

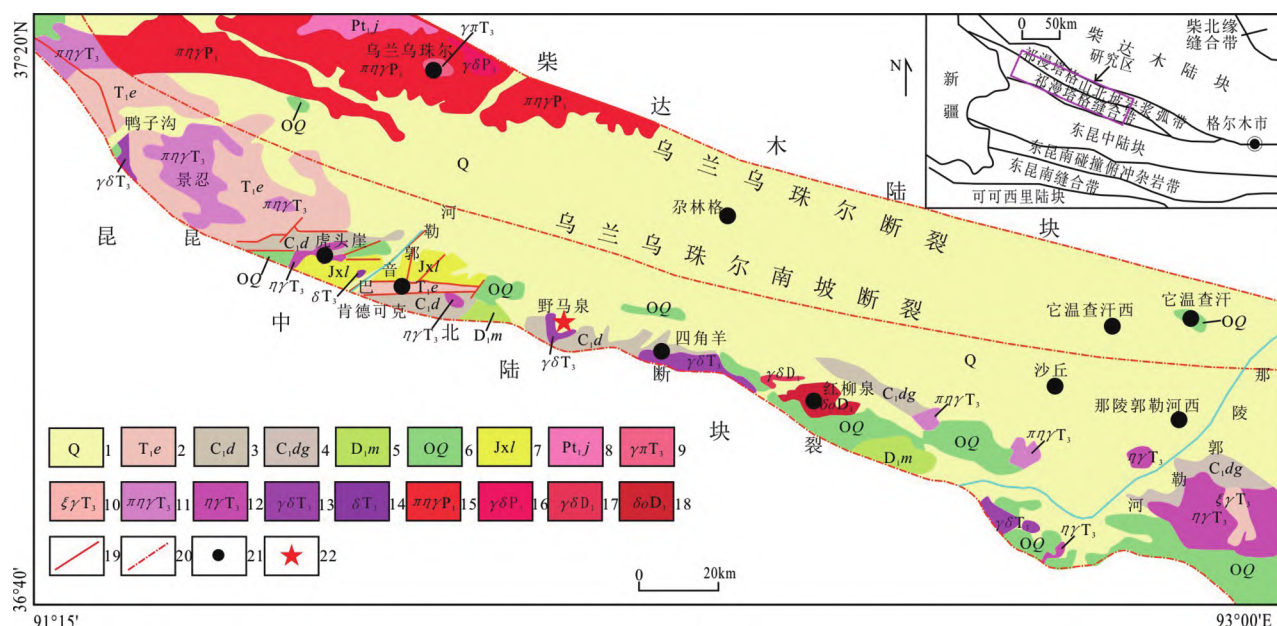


图1 野马泉地区区域地质简图

1—第四系;2—上三叠统鄂拉山组;3—上石炭统锦敖苏组;4—下石炭统大干沟组;5—上泥盆统牦牛山组;6—奥陶系祁漫塔格群;7—蓟县系狼牙山组;8—古元古界金水口群;9—晚三叠世花岗斑岩;10—晚三叠世正长花岗岩;11—晚三叠世似斑状二长花岗岩;12—晚三叠世二长花岗岩;13—晚三叠世花岗闪长岩;14—晚三叠世闪长岩;15—早二叠世似斑状二长花岗岩;16—早二叠世花岗闪长岩;17—晚泥盆世花岗闪长岩;18—晚泥盆世石英闪长岩;19—断层;20—大断裂;21—矿床;22—野马泉矿区

看出,区域内大部分典型矿床位于第四系覆盖区。野马泉地区地层主要有古元古界金水口岩群(Pt_1j)、蓟县系狼牙山组(Jxl)、奥陶系祁漫塔格群(OQ)、上泥盆统牦牛山组(D_3m)、下石炭统大干沟组(C_1dg)、上石炭统锦敖苏组(C_2d)、上三叠统鄂拉山组(T_3e)、第四系(Q)。区内花岗岩浆活动强烈,主要发育有早古生代和晚古生代—早中生代两个岩浆活动旋回的花岗岩类侵入岩,其中又以后者最为强烈,各个旋回的花岗岩类侵入岩主要受北西向和北西西向两组断裂构造控制。

1.2 矿区地质特征

野马泉矿区大地构造位置位于北昆仑岩弧,属东昆仑 $Fe-Pb-Zn-Cu-Co-Au-W-Sn$ 石棉成矿带。区内第四系风积、洪积物大面积分布,厚度较大,一般150~250 m,南部浅山区覆盖厚度为5~50 m。据钻孔资料和零星露头,地层自老至新有奥陶系祁漫塔格群、上泥盆统牦牛山组、上石炭统锦敖苏组、下—中二叠统打柴沟组及第四系(图2)。

矿区褶皱不甚发育,断裂十分发育,其中北西西向断裂组为矿区主要控矿构造;成矿后断裂主要

为北东东向断裂,对矿体具有一定破坏作用。

矿区侵入岩广泛分布,时代主要为印支期,总体自南西向北东侵入,据露头 and 钻孔资料,侵入岩分布面积大于15 km²。岩石类型主要有花岗闪长岩、含黑云母石英二长闪长岩、二长花岗岩,其次有少量二长闪长岩。

矿区分为南、北两个矿带。矿体产于中酸性侵入岩体与祁漫塔格群及锦敖苏组碳酸盐岩外接触带矽卡岩中。矽卡岩以铁镁质矽卡岩为主,其次为钙镁质矽卡岩和锰质矽卡岩,严格受矽卡岩和断裂构造控制。北矿带主要为产于磁异常M3、M4、M5、M7、M8、M11、M12中的矿体,主要为花岗闪长岩、石英二长闪长岩侵入于祁漫塔格群形成的接触交代变质带内的矽卡岩型铁多金属矿。南矿带主要为产于磁异常M1、M2、M6、M9、M10、M13内的矿体,主要为花岗闪长岩、二长花岗岩与祁漫塔格群、锦敖苏组大理岩接触带内的矽卡岩型铁多金属矿。

2 地球物理特征

2.1 区域地球物理特征

区域内开展过1:5万航空磁测工作(张洪瑞等,

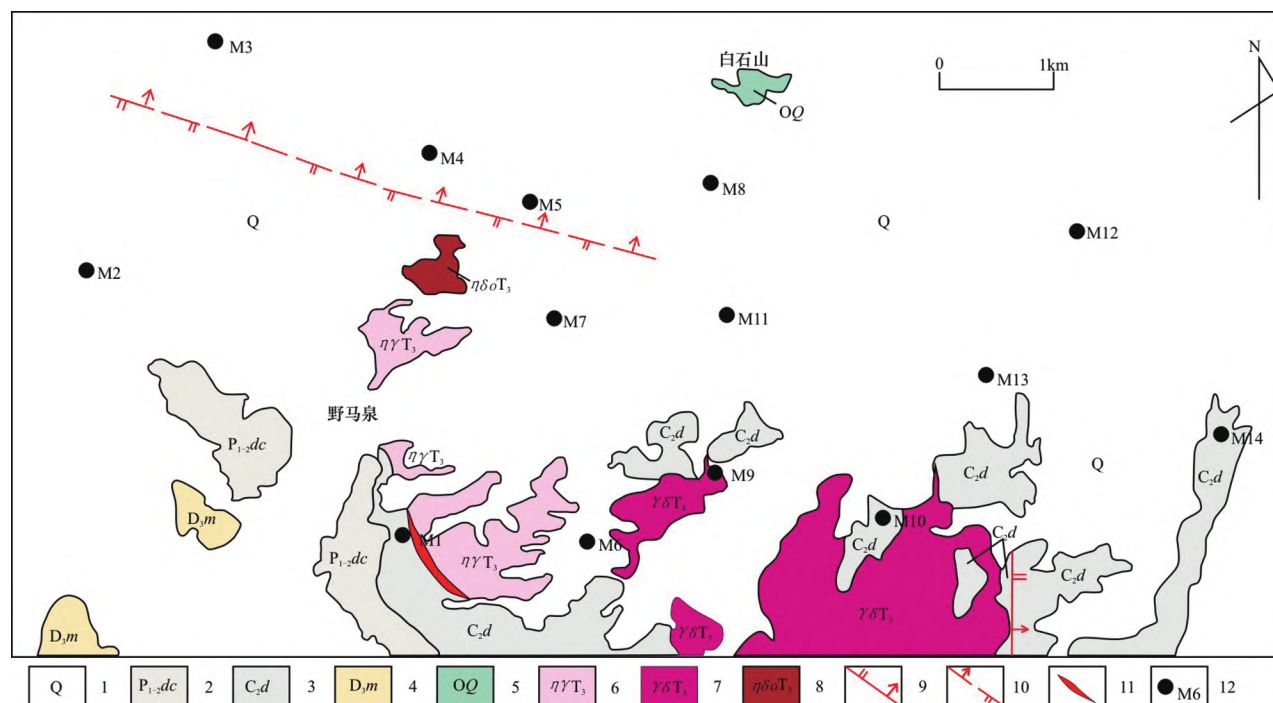


图 2 野马泉矿区地质图

1—第四系风成砂; 2—下一中二叠统打柴沟组; 3—上石炭统绵蕨苏组; 4—上泥盆统牦牛山组; 5—奥陶系祁漫塔格群; 6—晚三叠世二长花岗岩; 7—晚三叠世花岗闪长岩; 8—晚三叠世石英二长闪长岩; 9—实测正断层; 10—推测逆断层; 11—铁多金属矿体; 12—地磁异常及编号

2011^①) ,圈定的航磁异常大多与铁磁性矿产相关。从图 3 可以看出,野马泉矿区共圈定 3 处较明显的航磁异常,表现为负磁异常背景的椭圆或近圆状正磁异常,均与磁铁矿区相对应。其中航磁异常青 C-2009-57 对应于地磁异常 M4、M5,强度为 25.3 nT,异常中心飞行高度 707 m;航磁异常青 C-2009-59 对应于地磁异常 M13,强度为 51.4 nT,异常中心飞行高度 327 m;航磁异常青 C-1975-4 峰值处对应于 M6,强度为 2 nT,东南延伸方向的宽缓磁异常为四角羊铅锌铁矿区。

牛苦头矿区共圈定 2 处航磁异常,均为铁多金属矿体引起,青 C-2009-91 位于平缓正负变化磁场区中的正异常,北侧伴生负异常,曲线光滑,走向近东西,异常中心飞行高度 712 m,异常幅值 25.2 nT;青 C-2009-92 异常位于平缓变化负磁场中的局部孤立弱缓正异常,异常曲线光滑,北陡南缓,异常中心飞行高度 549 m,异常幅值 62 nT。

尔林格矿区共圈定 6 处航磁异常,长约 16 km,宽约 4 km,异常群位于平缓降低负背景场中的局部升高尖峰状正异常,表现为圆滑规则的,北侧伴生负异常,走向北西,最大强度 280 nT,该 6 处航磁异

常对应尔林格铁矿主矿体,矿区由 7 个矿群组成,北西西方向展布,东西长约 15 km,南北宽 1.5 ~ 3.5 km。

2.2 物性前提

从密度参数来看(表 1),磁铁矿、铅锌矿等矿石表现为高密度,矽卡岩密度次之,灰岩和大理岩密度均值为 2.720 g/cm³和 2.809 g/cm³,花岗闪长岩为 2.678 g/cm³,第四系最低。

电物性方面,磁铁矿(化)石、多金属矿石、炭质或含炭岩石在电物性上为低电阻率、高极化率,黄铁矿化岩石为中等电阻率、高极化率,而大理岩、中酸性侵入岩类等为高电阻率、低极化率。黄铁矿化、炭质或含炭岩石是利用电法直接寻找矽卡岩型铁多金属矿床的干扰因素。

M13 磁异常区典型勘探线剖面图见图 4,从图中可以明显看出地层、矿体、岩体的产出关系。

综合分析矿区主要岩矿石物性参数,从密度上看,岩体为低密度体,灰岩、大理岩等地层岩性为高密度体,尽管矿石和矿化岩石在密度值上为高密度,但由于规模相较围岩地层太小,再加之受到埋

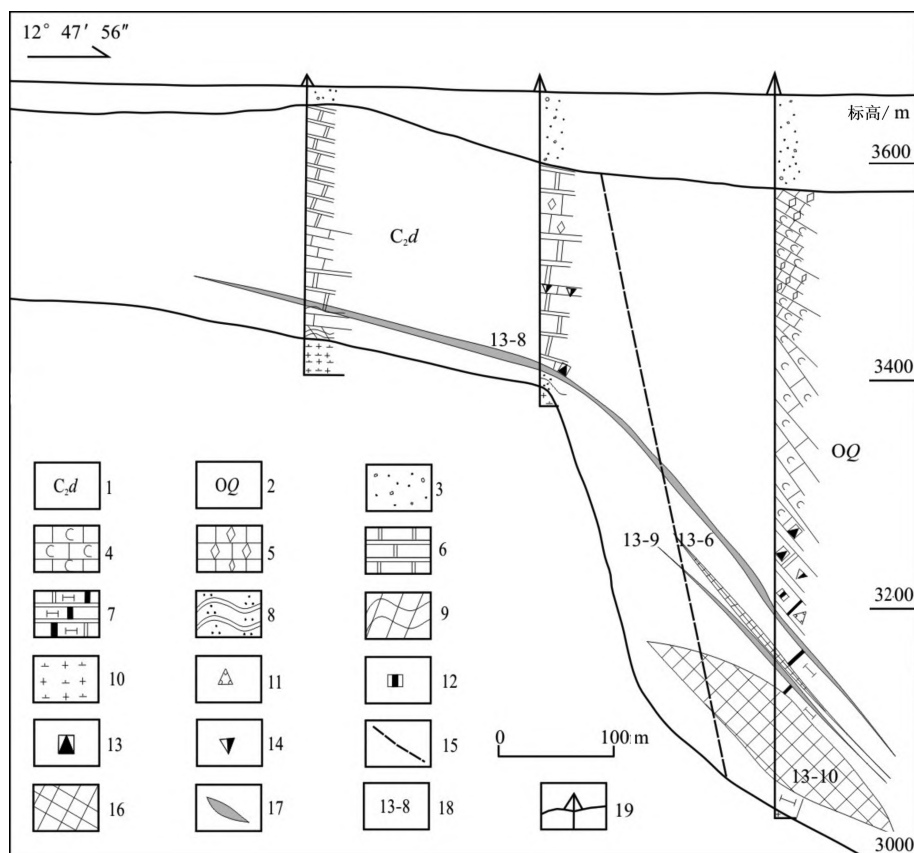


图4 野马泉矿区 M13 磁异常区 100 勘探线剖面图(据张爱奎等 2017 修改)

1—上石炭统绵敖苏组; 2—奥陶系祁漫塔格群; 3—冲洪积物; 4—炭质钙板岩; 5—结晶灰岩; 6—大理岩; 7—透辉砂卡岩; 8—变砂岩; 9—角岩; 10—花岗闪长岩; 11—萤石化; 12—磁黄铁矿化; 13—方铅矿化; 14—闪锌矿化; 15—推测成矿前断层; 16—铁矿体; 17—锌矿体; 18—矿体编号; 19—钻孔

善 2010a)。该方法既继承了 CSAMT 使用人工场源克服场源随机性的优点,也继承了 MELOS 方法非远区测量的优势,严格定义了适用于全域的公式计算视电阻率,拓展了人工源电磁法的观测范围,提高了观测速度、精度和野外工作效率(何继善, 2010b)。该方法只测量一个电场分量 E_x ,通过计算机迭代提取视电阻率,其最大优点是布置一次场源可以有效观测的平面范围大、野外移动场源的次数少、装备轻便、工作效率高(柳建新等 2019)。本次广域电磁法的工作参数为:工作装置为 E- E_x 、收发距为 15 km、供电电极距 AB 为 1 km、供电电流 110 A 左右、工作频率为 8192 ~ 0.625 Hz。数据处理及反演过程为:原始数据→飞点剔除→静态校正→频率-视电阻率拟断面图对校正后数据评价→一维反演→二维反演。反演软件使用的是 MTSOFT2D 软件,反演方法采用非线性共轭梯度法。

4 地球物理成果及钻探验证

4.1 重力成果

通过对见矿钻孔、磁异常和重力成果的综合研究,可以看到矿体与剩余重力异常正负过渡带有较好的对应关系(图 5),M1、M3、M4、M6 等磁异常区矿体分布于剩余重力异常正负过渡带。在此区域,相对重力高大多与含矿围岩相对应,而相对重力低则往往与侵入岩体关系密切,其转换部位则对应侵入岩体与含矿围岩接触带,这也是成矿有利地段,与本区控矿因素和成矿规律认识是一致的(刘光莲等 2019)。钻孔揭露的地质情况也证实了这一点。当岩体与地层接触带较陡时,剩余异常有相对明显的正负异常过渡带,如 M1、M3、M4、M5 磁异常等;而当接触带较平缓时,因岩体上覆有围岩地层,则表现为剩余重力异常低值区内的相对重力高,如

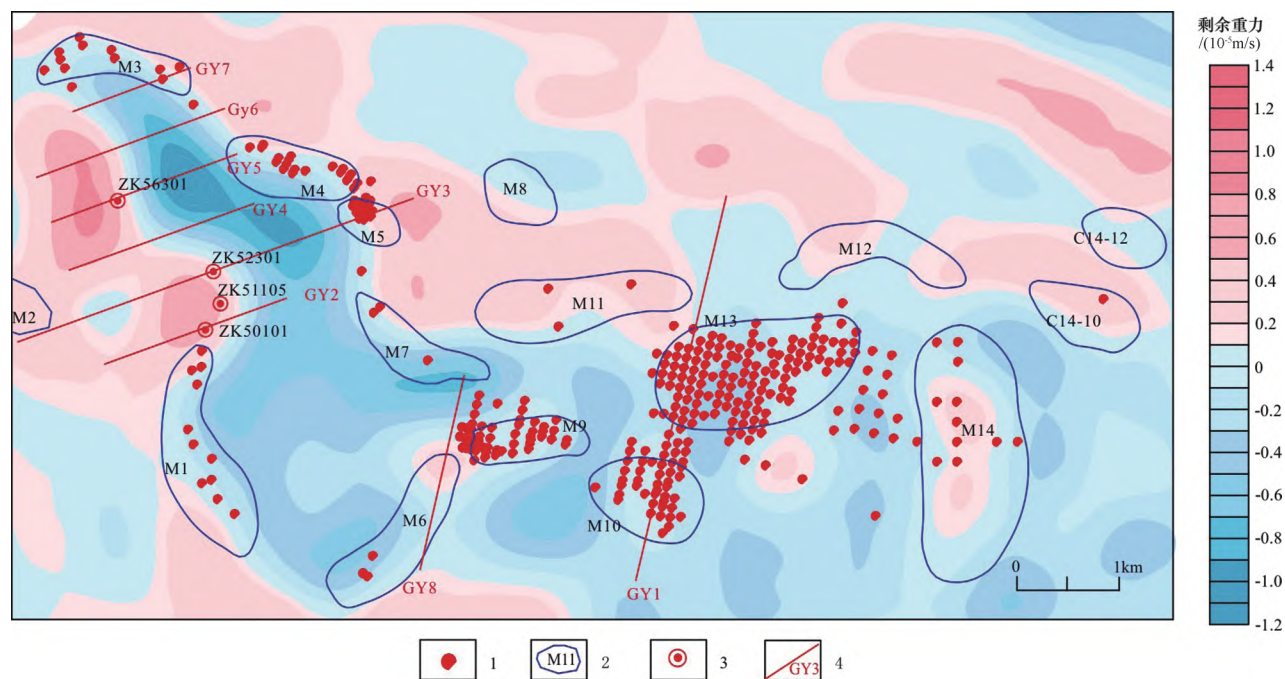


图5 野马泉矿区剩余重力异常及广域电磁法剖面布置图

1—见矿钻孔; 2—磁异常范围及编号; 3—本次施工钻孔; 4—广域电磁法剖面及编号

M9、M10、M13 磁异常。

重力工作对矿区岩体和地层分布范围反映清晰,根据矿致磁异常与重力异常的对应关系,以及本区矽卡岩成矿规律,认为在无磁异常的地段、剩余重力梯度带推断的岩体与地层接触带及其深部具有寻找矽卡岩型 Cu、Pb、Zn 多金属矿的潜力,通过后续的电磁法工作和钻探验证见矿,证实了这一推断,突破了矿区仅依靠磁异常找矿的瓶颈,开启了重力间接找矿的新阶段。

4.2 电磁法成果

为研究 M1 ~ M3 磁异常之间的重力异常梯级带,寻找可能存在的矽卡岩带,矿区开展了广域电磁法工作,目的是了解深部地层与岩体分布情况及深部接触带的埋深情况,推测深部成矿有利部位,为开展多金属矿深部找矿工作提供依据。

首先,在 M10、M13 磁异常 52 勘探线已知剖面进行了方法试验(图 5 中 GY1 线)。从广域电磁法试验剖面成果来看(图 6),高阻区域对应于岩体,低阻区域对应于炭质地层,高低阻过渡区域与已知矽卡岩带对应良好。整个断面对各地质体深部空间特征反映清晰,岩体界面与勘探线实际界面较为吻

合,铁多金属矿体位于高低阻转换区域,表明广域电磁法在本区能有效的划分深部主要地质体及岩体与地层接触边界。

在 M1 ~ M3 磁异常之间的弱磁异常区、重力异常梯级带及穿越 M6、M9 磁异常重力异常梯级带共布置了 7 条广域电磁法剖面(图 5)。通过工作,较精细的划分出了地层及岩体的分布范围及其埋深情况,对指导该区段钻探工作提供了有力的地球物理依据,所布置的 4 个钻孔全部钻遇地层与岩体分界线,并见矽卡岩型多金属矿体。下面以 GY3 线为例进行说明:

GY3 线长度 4.52 km,测量点距为 40 m。地表出露地层主要为第四系,另有少量石炭系绵敖苏组及花岗闪长岩体露头。反演推断解释图(图 7)上电阻率分布总体呈中间高两边低特征,反映了中部花岗闪长岩的侵入活动。

剖面中的浅层电性层,反演电阻率值为 60 ~ 200 $\Omega \cdot m$,反映近地表的第四系,厚度一般在 0 ~ 50 m。在剖面中部 72 ~ 76 号点的近地表段有面积较小的中阻异常,与已知出露的岩脉相对应。

反演解释图中电阻率值为 10 ~ 300 $\Omega \cdot m$ 的区域,推断低阻异常是由含炭或炭质地层引起,厚度

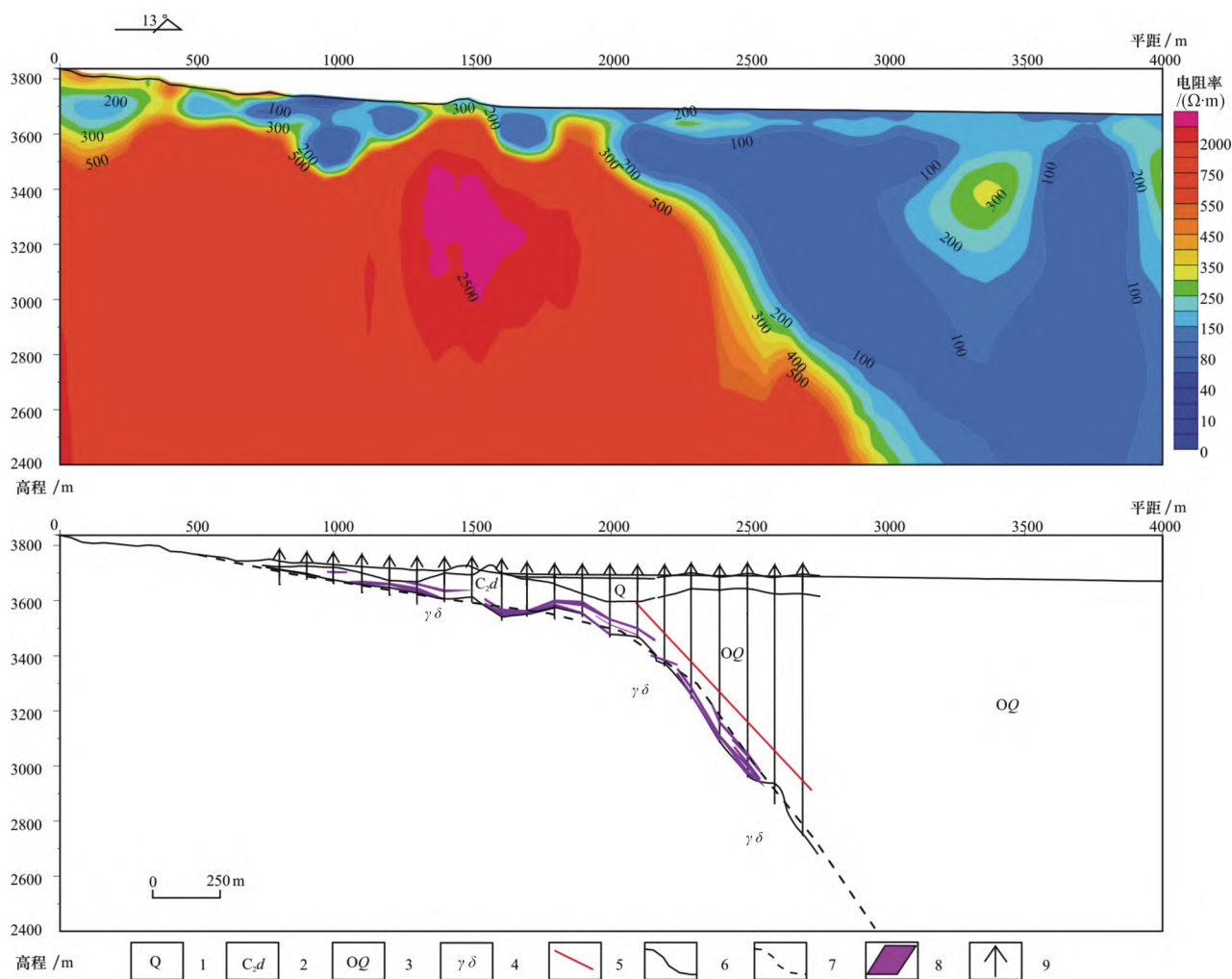


图 6 52 线广域电磁法反演断面及推断解释图

1—第四系; 2—上石炭统绵敖苏组; 3—奥陶系祁漫塔格群; 4—花岗闪长岩; 5—断裂; 6—地质界线; 7—推断地质界线; 8—矿体;
9—钻孔位置及编号

在 400 ~ 2500 m 以深, 由北往南慢慢变深。48 ~ 100 号点地层埋深较浅, 一般为 200 ~ 500 m, 其下部推断为岩体, 此段为寻找矽卡岩带的有利地段。100 ~ 114 号点绵敖苏组地层埋深相对较深, 底板埋深在 500 ~ 2300 m, 往北埋深变大。

反演解释图中电阻率值为 $300 \Omega \cdot m$ 以上的区域推断为岩体。在 100 号点附近推断岩体有向上凸起, 其正好与 M5 磁异常中心点相吻合, 矿区在 M5 磁异常内对铁多金属矿体已经进行了开采, 表明此地段含矿性非常好, 与广域电磁法反演成果相吻合。

根据广域电磁法推断的岩体界线及剩余重力异常梯度带, 在 59 号点处布置了 ZK52301, 推断该处岩体顶深为 350 m (图 7), 以期在地层与岩体接触带内发现多金属矿体。经钻孔实施, 在 97 m 处见

黄铜矿—闪锌矿, 133 m 处见闪锌矿, 240 m 处见黄铜矿, 350 m 处见黄铜矿—闪锌矿—铅锌矿, 376 m 处见岩体顶部, 见矿较好。实际钻遇岩体界面与反演推断的岩体界面吻合度很高。

5 结论

(1) 在祁漫塔格成矿带覆盖区寻找矽卡岩型铁多金属矿床, 由于磁铁矿相对围岩具有明显的磁性差异, 磁法是本区以往寻找铁磁性矿产的最直接、有效的方法; 重力和电磁法可对深部岩体与地层接触带进行划分, 提供覆盖区的地质背景信息, 是有效方法, 起到间接找矿作用, 可指示多金属矿成矿有利区段。磁异常位置是磁铁矿(化)富集位置; 高低重力异常过渡带对应于岩体与地层接触矽卡岩

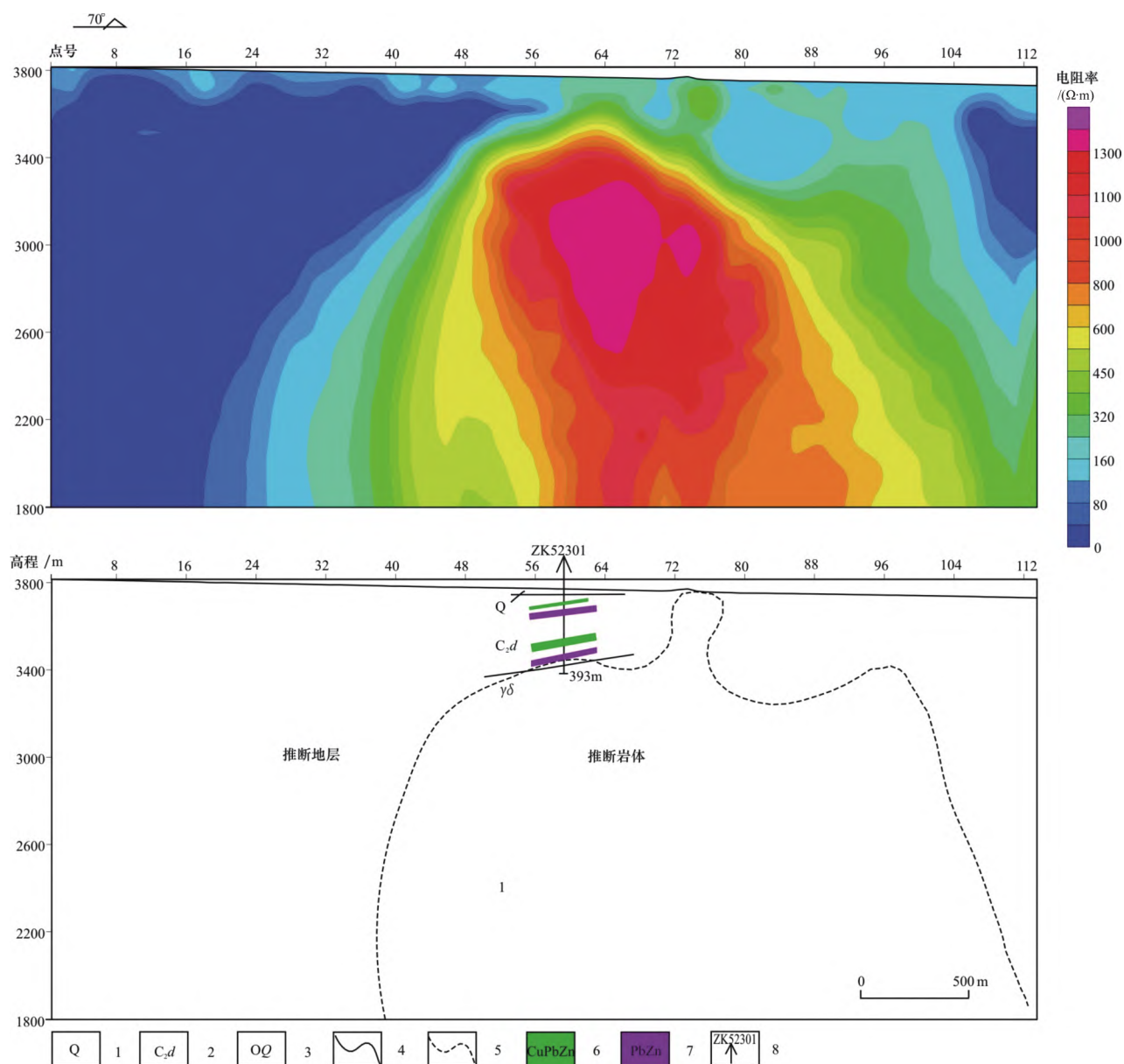


图7 GY3线广域电磁法反演断面及推断解释图

1—第四系;2—上碳统缙敖苏组;3—花岗闪长岩;4—地质界线;5—推断地质界线;6—铜铅锌矿体;7—铅锌矿体;8—钻孔位置及编号

带,接触带没有磁异常位置可能赋存有多金属矿体;电磁法高低电阻过渡带与岩体和地层接触区域相对应,低于 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 的视电阻率区域多对应于含炭或炭质地层。

(2) 在祁漫塔格覆盖区寻找隐伏铁多金属矿床,建议的物探方法组合为:磁法为主,辅以重、电磁法;在弱磁异常区建议开展重力和电磁法工作。物探找矿标志:强度几百至几千 nT 地磁异常为铁矿直接找矿标志,布格重力异常梯级带、剩余重力高低异常过渡区或剩余重力异常低值区内的相对

重力高、电磁法高低阻过渡区域为间接找矿标志。

(3) 祁漫塔格成矿带的山前覆盖区还有众多与野马泉矿区地貌景观和成矿地质条件相近的矿床,找矿手段以磁法为主,没有或者很少开展其他物探方法,弱磁异常区几乎没有开展找矿工作。因此,综合物探方法在野马泉弱磁异常区段深部找矿的成功应用,对祁漫塔格成矿带覆盖区找矿具有很好的示范作用,必将在下阶段覆盖区深部找矿工作中发挥重要作用。

注 释

- ① 张洪瑞,叶挺明,朱晓颖. 2011. 东昆仑祁漫塔格 1:5 万航磁调查成果报告[R]. 北京: 中国国土资源航空物探遥感中心.

参考文献

- 常志岐,敬荣中,黄理善,黄航如. 2012. 广西某锡矿地质-地球物理模型及成矿预测研究[J]. 矿产与地质, 26(2): 157-160.
- 陈丙强,田旭峰. 2011. 综合物探方法在柿竹园矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 31(3): 27-29, 88.
- 丰成友,李东生,屈文俊,杜安道,王松,苏生顺,江军华. 2009. 青海祁漫塔格索拉吉列砂卡岩型铜铅矿床辉钼矿-钼同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 223-227.
- 何继善. 2010a. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 何继善. 2010b. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(3): 1065-1072.
- 敬荣中,曾高福,黄理善,曾晖. 2011. 危机矿山深边部找矿地球物理方法与应用研究[J]. 云南冶金, 40(S2): 68-72.
- 寇玉才,李战业,王英孝,孟军海. 2010. 杂林格砂卡岩型铁多金属矿床地质-地球物理模型[J]. 西北地质, 43(2): 20-31.
- 刘光莲,刘宇宏,朱传宝,张爱奎,刘永乐,孙非非,白国龙,刘军培. 2019. 青海东昆仑西段野马泉铁多金属矿床成矿模式及找矿模型[J]. 矿产勘查, 10(9): 2162-2170.
- 刘维,吴岗. 2010. 国土资源大调查矿产资源评价成果[N]. 中国国土资源报, 11月17日第7版.
- 刘云华,莫宣学,喻学惠,张雪亭,许国武. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2457-2463.
- 柳建新,赵然,郭振威. 2019. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 34(1): 151-160.
- 宋忠宝,贾群子,张占玉,何书跃,陈向阳,全守村,栗亚芝,张雨莲,张晓飞. 2010. 东昆仑祁漫塔格地区野马泉铁铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 43(4): 209-217.
- 李双龙,王新雨,王玉佳,祝新友,李加多,吴锦荣,郭博然,蔡亚伟,

- 陈昱,耿建. 2022. 青海牛苦头矿区成矿类型及矿化样式研究[J]. 矿产勘查, 13(7): 887-894.
- 谭红艳,吕骏超,刘桂香,马诗敏,舒广龙,席振铎. 2011. EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J]. 地质与勘探, 47(6): 1133-1141.
- 汪青松,张顺林,张金会,张家嘉,尤森. 2020. 皖东北厚覆盖区构造蚀变型金矿勘查模式与关键技术——以五河金矿整装勘查区为例[J]. 安徽地质, 30(4): 295-301.
- 汪青松,张金会,尤森,毛思斌,产思维. 2021. 井中矿层多要素探测方法研究与厚覆盖区金矿勘查试验——以皖东北五河地区为例[J]. 地质与勘探, 57(1): 136-145.
- 吴烈善,彭省临. 2004. 大型金属矿山深边部找矿思路和方法浅析[J]. 矿产与地质, 18(5): 480-483.
- 严永邦,郭崑明,白国龙,张爱奎,刘智刚,奎明娟. 2018. 高原荒漠区砂卡岩型-热液型铁多金属矿勘查技术方法探讨[J]. 物探化探计算技术, 40(5): 646-653.
- 袁桂琴,杨少平,孙跃,石旭东,王英秀,李秀菊,陈丽娟. 2012. 隐伏金属矿勘查中物化探方法技术应用研究[J]. 物探化探计算技术, 34(6): 631-639, 619.
- 张爱奎,莫宣学,李云平,吕军,曹永亮,舒晓峰,李华. 2010a. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. 地质通报, 29(7): 1062-1074.
- 张爱奎,莫宣学,刘光莲,尚小刚,王维. 2010b. 野马泉矿床特征及找矿潜力分析[J]. 矿产与地质, 24(2): 97-106.
- 张爱奎,莫宣学,袁万明,刘光莲,朱传宝,郝娜娜. 2016. 东昆仑西部野马泉地区三叠纪花岗岩成因与构造背景[J]. 矿物学报, 36(2): 157-173.
- 张爱奎,李东生,何书跃. 2017. 青海省祁漫塔格地区主要矿产成矿规律与成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 张叶鹏,王红,黄朝宇,肖新星,杜成额,刘灿娟. 2016. 物探方法在深边部找矿中的有效性探讨——以浏阳市七宝山铜锌矿区为例[J]. 物探与化探, 40(4): 695-700.
- 朱传宝,孙非非,袁万明,张爱奎,张大明,马忠元,周青禄,王生明,赵梦琪,刘光莲. 2018. 东昆仑野马泉地区磷灰石裂变径迹热年代学及构造意义[J]. 地球科学, 43(6): 2019-2028.